



universitätsverlag
ilmenau

Irlinger, Franz; Büscher, Wolfgang:

**Automatisierung der Lagenscharsynthese als Verfahren der
Maßsynthese für Viergelenke bei gegebenen Koppelkurven**

URN: urn:nbn:de:gbv:ilm1-2013100033-217-2

URL: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2013100033-217-2>

Erschienen in:

10. Kolloquium Getriebetechnik : Technische Universität Ilmenau, 11. - 13.
September 2013. - Ilmenau : Univ.-Verl. Ilmenau, 2013. - S. 217-230.
(Berichte der Ilmenauer Mechanismentechnik ; 2)

ISSN: 2194-9476

ISBN: 978-3-86360-065-5 [Druckausgabe]

URN: urn:nbn:de:gbv:ilm1-2013100033

URL: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2013100033>

AUTOMATISIERUNG DER LAGENSCHARSYNTHESE ALS VERFAHREN DER MASSSYNTHESE FÜR VIER- GELENKE BEI GEGEBENEN KOPPELKURVEN

Dr.-Ing. Franz Irlinger, Dipl.-Ing. Wolfgang Büscher**

* TU München, Lehrstuhl für Mikrotechnik und Medizingerätetechnik
irlinger@tum.de, Tel.:089- 289 151 88

Abstract

Zur Erfüllung von Punktführungsaufgaben werden Viergelenkgetriebe aufgrund ihrer Vielfalt von möglichen Koppelkurven in vielen Bereichen der Technik eingesetzt. Sie sind robust, kostengünstig und weisen speziell gegenüber seriellen Strukturen mit höheren Freiheitsgraden sehr gute dynamische Eigenschaften auf. Allein die Maßsynthese stellt im Konstruktionsalltag ein Problem dar. Auch wenn die gängigen Verfahren beherrscht werden, bieten diese oft nur die Möglichkeit wenige Punktlagen exakt zu erfüllen. In diesem Artikel wird eine Software auf Grundlage der Lagenscharsynthese vorgestellt. Im Vorfeld wurden Untersuchungen durchgeführt um auch unerfahrene Nutzer durch den Syntheseprozess zu führen und ihm mögliche Lösungsräume aufzeigen zu können. Schließlich können die bestimmten, umlauffähigen Viergelenke simuliert, und bewertet werden.

For performance a point-guiding-challenge the usage of four-bar-linkages in technical environment is helpful because of their plentitude of possible trajectories. They are robust, low-cost, and implement high-dynamic properties especially seen in contrast to with structures of higher degrees of freedom. Only the dimensioning of the bars and locating of fixed bearing resolve with problems. Also the usual methods are well known, they enable the exact synthesis for only four positions. So in this article a program based on the "Lagenscharsynthese" is presented. In the forefront analyses were made to check, if inexperienced persons could be guided thru the process of synthe-

sis and show them areas of possible solutions. Finally the defined rotatable four-bar-linkages can be simulated and evaluated.

1 Problemstellung

In der Handhabungs- und Verpackungsindustrie gilt es oft Teile innerhalb eines vorgegebenen Arbeitsraum oder Toleranzband entlang einer Kurve zu führen. In letzter Zeit wurden dazu häufig frei programmierbare Industrieroboter benutzt. Der Vorteil der einfachen Programmierung wird aber durch eine große Anzahl an Nachteilen erkaufte. Oftmals kommen serielle Mechanismen zum Einsatz, deren Freiheitsgrade die notwendige Anzahl deutlich übersteigt, die notwendig wäre einen Körper auf einer ebenen Punktbahn zu führen. Das resultiert in einem schlechteren dynamischen Verhalten, hohen Kosten und verminderter Sicherheit.

Trotz der großen Formenvielfalt von Koppelkurven, die mathematisch Kurven 6. Ordnung darstellen, ist es bei Verwendung von analytischen Methoden im Allgemeinen nicht möglich, mehr als 4 exakte Punktlagen vorzugeben. Nur so können noch Randbedingungen wie Bauraum oder Umlauffähigkeit berücksichtigt werden. Da bei den meisten Bewegungsaufgaben eine exakte Erfüllung der Bahn gar nicht nötig ist, sondern vielmehr eine ungefähre aber harmonische Bewegung gewünscht ist, wäre ein Verfahren wünschenswert, welches die Abweichungen entlang einer Bahnvorgabe minimiert. Die Methode der Lagenscharsynthese bietet hier vielversprechende Ansätze. Hierzu stehen aber keine Programmsysteme zur Verfügung, welche ohne große Erfahrung oder mehrfache Iterationen zu einer Lösung kommen.

2 Stand der Technik

Bisher wird die Synthese von Viergelenken zur Erfüllung von Bewegungsaufgaben über folgende Ansätze verfolgt:

- mathematische Optimierung (9 definierende Parameter)
- diskrete Exaktlagensynthese (üblicherweise vier Lagen)
- Koppelkurvenatlanten
- Lagenscharsynthese (bisher keine vermarktete Nutzung)

In [1] und [2] wird die Optimierung der 9 bestimmenden Parameter eines Viergelenks durch mathematische Algorithmen beschrieben. Die Parameter werden dabei solange variiert und das Ergebnis durch eine Analyse bewertet, bis ein ausreichend gutes Ergebnis vorliegt.

Das Programmsystem Approx / Optima [3] verlangt die Eingabe von Abmessungen, um dann im Optimierungsprozess innerhalb von vorzuziehenden Variationsgrenzen Viergelenksmaße zu synthetisieren.

Genesys [4] ist ein komplettes Programmsystem, welches auf der Genauagsynthese beruht. Diese geschickt eingesetzt, hilft dem erfahrenen Konstrukteur bei der Synthese, jedoch muss dieser das komplexes Programmsystem beherrschen lernen. Es können nur wenige Lagen vorgegeben werden, diese werden dann exakt erfüllt, der Bahnverlauf zwischen den Lagen bleibt unberücksichtigt. Wird kein verwertbares Ergebnis erzielt, können die Lagen innerhalb wählbaren Grenzen variiert werden, um dadurch andere Ergebnisse zu erzielen.

„SAM (Simulation and Analysis of Mechanisms) ist ein interaktives PC-Software Programm für den Entwurf, die Bewegungs- und Kraftanalyse und für die Optimierung willkürlicher ebener Getriebe“ [5]. Der integrierte Design Wizard umfasst unter anderem die 3-Lagensynthese sowie die angenäherte und exakte Geradföhrung.

Die Lagenscharsynthese [6] ist eine bisher kaum beachtete Methode. Auf Grundlage von wenigen Vorgaben wird der mögliche Lösungsraum durch die Nutzung getriebetechnischer Zusammenhänge zielgerichtet eingeschränkt.

3 Nachteile Stand der Technik

Der Stand der Technik ermöglicht die Synthese von Viergelenken zur exakten Erfüllung weniger Lagen, kann aber keine Näherungslösungen für vorgegebene Wunschkurven bieten. Die Berücksichtigung einer kompletten Bahn ist direkt im Syntheseprozess bisher nicht abbildbar, denn die am Markt erhältlichen Programme vollziehen automatisiert lediglich die Analyse, der Mechanismus aber muss vom Benutzer selbst eingegeben werden. Die automatisierte Synthese eines Viergelenks zu einer gegebenen Koppelkurve ist bisher nicht möglich. Das bedeutet, dass der Konstrukteur viel Erfahrung in der Getriebesynthese mitbringen muss.

Außerdem mangelt es an einer Lösungsraumbewertung. Sprich, einer Landkarte, welche zu einer gegebenen Koppelkurve jene Bereiche angibt, die für An-/Abtriebslager geeignet sind.

Die bisherigen prototypischen Softwareumsetzungen der Lagenscharsynthese [7] verlangen noch, dass der Nutzer/Konstrukteur die Lagenscharsynthese selbst beherrscht; der Grad an Automation ist gering.

4 Aufgabenstellung

Auf der Basis der bekannten Lagenscharsynthese soll ein Programmsystem für die Maßsynthese von Viergelenken entwickelt werden. Vorgabe soll eine Koppelkurve sein, die von dem zu synthetisierten umlauffähigen Viergelenk durchlaufen wird. Dazu müssen alle gefundenen Viergelenke mittels einer Zielfunktion bewertet werden, um das optimale Getriebe auszugeben. Zusätzlich sollen dem Nutzer Bereiche markiert werden, in denen Lösungen für die Gestellgelenke möglich sind und wie die zu erwartende Qualität der Erfüllung sein wird.

Die Software soll gleichzeitig auch den schrittweisen Ablauf der Lagenscharsynthese für eine manuelle Nutzung zur Verfügung stellen, dabei für möglichst viele Parameter Einstellmöglichkeiten bieten und somit dem Wunsch nach einer Experimentierplattform nachkommen. Dies soll dem Erkennen eventuell existierender bisher aber unbekannten kinematischen Zusammenhängen dienen.

5 Erwartete Vorteile und Funktionen der Lösung

Als erster zu erwartender Vorteil ist zu nennen, dass Nutzer Mechanismen zur Erfüllung Ihrer Wunschbahnen automatisch entwickeln lassen können, ohne in der Getriebesynthese erfahren sein zu müssen.

Das Programm soll auf der Basis minimaler Vorgaben günstige Positionen für An- und Abtriebslager finden, und darüber hinaus auch die zugehörigen Maße aller Glieder des Viergelenks ausgeben.

Die Software soll es ermöglichen, mit der Lagenscharsynthese als wissenschaftlicher Methode zu experimentieren. Es wird erwartet, dass die Software hilft, getriebetechnische Zusammenhänge zu erkennen und zu verifizieren. Mit diesem neu gewonnenen Wissen könnte die Getriebesynthese weiter vereinfacht und beschleunigt werden.

6 Beschreibung der Lösungsstruktur

Eine Lagenschar setzt sich zusammen aus der Summe der zeitlich varianten Positionen und Orientierungen einer Ebene. Ist nur eine Punktfolge als Koppelkurve vorgegeben, so sind nach Wahl des Antriebslagers zwei Ebenenbewegungen denkbar: Bei der einen wird der Kurbelkreis und die Koppelkurve gleichsinnig, bei der anderen gegensinnig durchlaufen (Abb. 1). Da bei der gegensinnigen Bewegung der Rotationsanteil im Allgemeinen höher ist, liegen die Drehpole der Lagenschar näher an der Koppelkurve als bei der gleichsinnigen Bewegung.

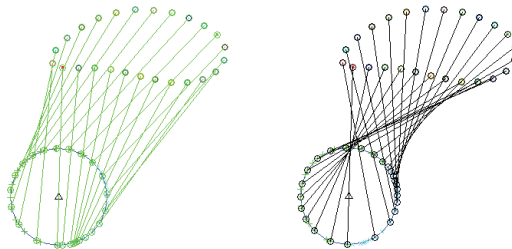


Abb. 1: Zwei generierte Lagenscharen zur gleichen Koppelkurve mit gleichem frei gewähltem Antriebslagerort; links gleichsinnig, rechts gegensinnig.

Die allgemeine Bewegung in der Ebene besteht aus 1 Rotation und 2 Translationen. Sie lässt sich immer auf eine reine Drehung um den Drehpol $P_{i,k}$ (Index: aus Lage i in Lage k) reduzieren (vgl. Abb. 2). Er ist der Ort des Drehzentrums (vgl. Abb. 2).

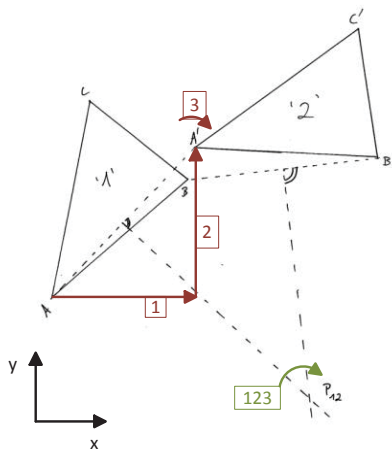


Abb. 2: zwei Translationen und eine Rotation entsprechen einer reinen Rotation um den Drehpol

Betrachtet man nun zwei infinitesimal unterschiedliche Lagen, so geht der Drehpol $P_{i,k}$ in den Momentanpol $M_{i,i+\varepsilon}$ über.

Basierend auf der Umkehrung der Analyse beruht die Methode der Lagen-scharsynthese (in [7] als Drehpolkurvenverfahren bezeichnet) auf der Gesamtheit aller Drehpole, der Drehpolwolke. Sie entsteht, wenn man für die Überführung der Koppel aus jeder möglichen Lage in alle möglichen Lagen alle jeweiligen Drehpole bestimmt: $\sum^{l,k} P_{i,k}$.

An der Gestalt der Drehpolwolke lassen sich charakteristische Eigenschaften der Lagenbewegung ablesen. Bei der Bewegung der Koppel eines echten Viergelenks zieht sich die Drehpolwolke im Festlager des Abtriebs zu einem Punkt zusammen. Bei annähernd echten Lagenbewegungen weist sie zumindest eine Einschnürung auf (vgl. Abb. 3). Die Gestalt der Kurve kann man sich für die Synthese zu Nutze machen.

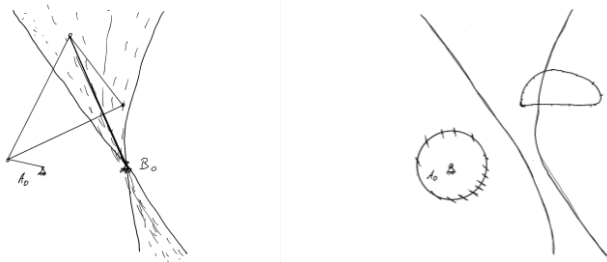


Abb. 3: Links: Polwolke einer Koppel eines echten Viereckgelenks.

Rechts: Polwolke einer Koppelbewegung, die wegen eines leicht verschobenem Antriebslagerortes nicht mehr exakt von einem Viereckgelenk erfüllt werden kann.

So wird sichtbar, dass die Drehpol-dichte zur Einschnürung hin steigt. Die Dichte der Drehpolwolke kann in der Genauigkeit eines hinterlegten diskreten Rasters ermittelt und der Ort der höchsten Dichte als Lager B_0 des Abtriebs definiert werden.

Weitere Alternativen zur Bestimmung von B_0 sind:

Drehpole lassen sich in Drehpolkurven zusammenfassen. So kann definiert werden, dass die Drehpole, die zur selben Ausgangspose gehören, in Summe eine Drehpolkurve bilden: $\sum^k P_{i,k}$. Der Schnittpunkt zweier Drehpolkurven $\sum^k P_{i,k} = \sum^{j,l} P_{j,l}$ (es können auch mehr als einer existieren) kann als Lager des Abtriebs genutzt werden, was zur besseren Erfüllung der zugehörigen vorgegebenen Koppelpunkte führt. Will man die Gesamtheit der Kurve möglichst genau abbilden, beschreibt [7], warum einer der Schnittpunkte derjenigen Polortkurven, die zum nächsten und entferntest gelegenen Koppelpunkt bzgl. A_0 gehören, für die Wahl des Lagers B_0 am günstigsten ist.

Die dritte Möglichkeit ist, für ein geometrisches Feld von denkbaren B_0 die Relativlagen zu berechnen und durch diese jeweils einen Ausgleichskreis zu legen. Derjenige B_0 -Ort mit der geringsten Abweichung seiner Relativlagen von einer Kreisbahn ist der geeignetste, sein Mittelpunkt entspricht dann dem zugehörigen Gelenk B.

7 Beschreibung der Lösungsprozesse

Steht nur eine Bahnkurve und keine Lagenschar als Ausgangsdaten zur Verfügung, so lässt sich durch die beliebige Wahl eines Antrieblagerortes eine Lagenbewegung erzeugen (vgl. Abb. 1) und daraus eine Drehpolwolke zur vorgegebenen Koppelkurve generieren. Voraussetzung für gute Ergebnisse ist eine durch Viergelenke approximierbare Koppelkurve und die Kenntnis eines geeigneten Gebiets für den Antrieb A_0 . Daher wird im vorliegenden Programmsystem aus [8] und [9] ein Bauraum für den Antriebslagerort definiert und alle Positionen als Startparameter für den nachfolgenden Syntheseprozess genutzt.

Aus der Position dieses Lagers wird nun der Antriebskreis berechnet (vgl. Abb. 4). Die Differenz der Abstände des gewählten Lagers A_0 zum nächst gelegenen und entferntest gelegenen Punkt der Koppelkurve ergibt den Durchmesser des Antriebskreises. Dies ist logisch, da mit einer Umdrehung der Kurbel beide Punkte erreichbar sein müssen. Der Abstand des Antriebslagers zum entferntest gelegenen Punkt setzt sich dann aus Antriebskreisradius (a) und Koppellänge (e) zusammen.

Dann kann eine Lagenschar generiert werden (vgl. Abb. 1). Zur Erstellung der Lagenschar wird das Glied mit der Länge e an Koppelkurve und Antriebskurbelkreis angelegt und entlang beider Kurven einmal herumgeführt. Die Betrachtung jedes einzelnen Augenblicks entspricht einer Lage. Nun wird aus der Lagenschar die Drehpolwolke berechnet. Weist sie grob die Struktur einer Sanduhr auf, so kann in den Ort der Einschnürung das Lager B_0 (Abtrieb) gelegt werden, ansonsten ist die Wahl des Antriebslagerortes ungünstig. Die Berechnung kann dann für diesen Antriebsort abgebrochen werden.

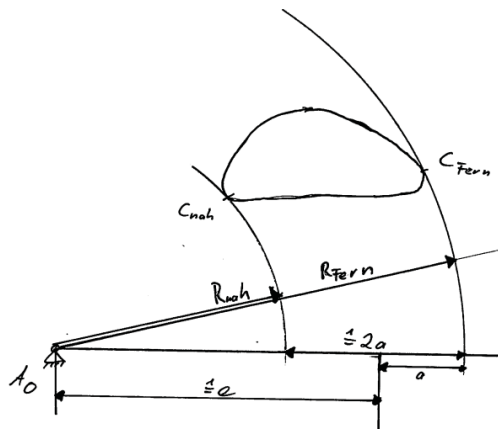


Abb. 4: Bestimmung des Kurbelradius und der ersten Seite des Koppeldreiecks nach dem der Ort des Antrieblagers frei gewählt wurde.

Zur Bestimmung der Schwingenlänge nutzt man die kinematischen Umkehr: Man betrachtet von der Koppel aus, ob und wie sich das Lager B_0 auf einer Kreisbahn bewegt. Der Mittelpunkt dieses Kreises, auf der Koppalebene, entspricht dem Gelenk B, das Schwinge und Koppel verbindet.

Der Abstand von B nach B_0 ist die Schwingenlänge c , der Abstand von A nach B, jeweils in der Bezugslage, die Koppellänge b . Schließlich ergibt sich noch die Länge f und/oder wahlweise der Winkel zwischen e und b aus den geometrischen Beziehungen am Dreieck. Die Koppellänge e sowie der Kurbelradius des Antriebs wurden schon am Anfang bestimmt. Damit ist das Viergelenk bestimmt.

Die vorangegangenen Schritte können nun mit variiertem Antrieblagerort A_0 wiederholt werden und die Erfüllungsgenauigkeiten zur vorgegeben Wunschkurve verglichen werden.

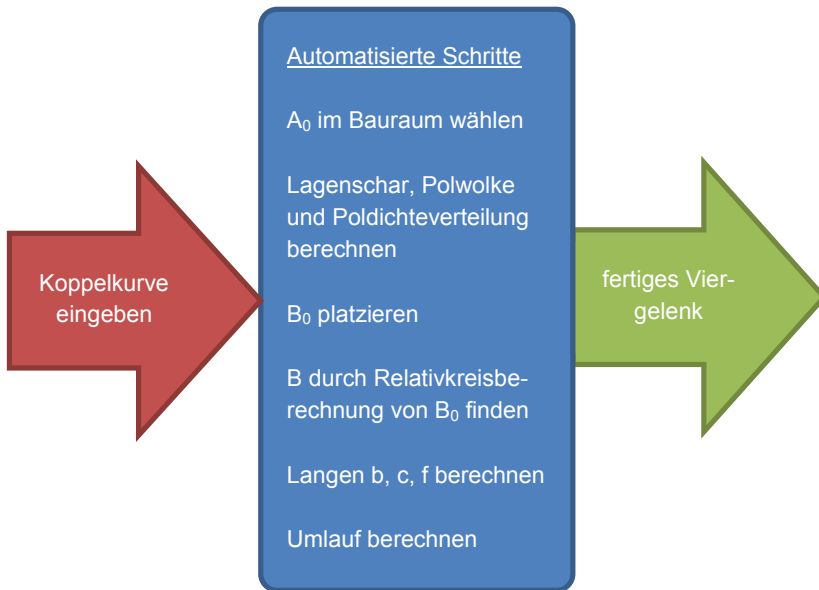


Abb. 5: Schematisch Beschreibung der geplanten Ablaufstruktur

8 Unterscheidungsmerkmale der Lösung

Der elementare Unterschied der Lagenscharsynthese gegenüber anderen Methoden ist, dass keine Exakt-Lagensynthese sondern eine optimierte Näherungslösung berechnet wird. Die Schritte aus der Lösungsstruktur sind soweit nicht neu, denn die Lagenscharsynthese ist seit vielen Jahren bekannt. Neu ist jedoch, Entscheidungen und Wissen des Nutzers in ein Programmsystem zu hinterlegen, so dass vom Nutzer lediglich die Wunschkurve eingegeben werden muss.

Da es für die Wahl des Antriebslager A_0 bisher keine Hinweise gibt, wird innerhalb eines geometrischen Feldes der Ort automatisch variiert. Dies widerspricht der Vorgabe der Zielgerichtetheit nicht, da zur angenäherten Erfüllung einer Kurve mehrere Viergelenke mit verschiedenen Antriebslagerorten in Frage kommen können.

Ist das Lager B_0 festgelegt, folgt die Bestimmung der Schwingenlänge. Dazu wird der „Blick“ auf das Lager B_0 aus allen Lagen eingefroren und in eine beliebig wählbare Bezugslage überführt. Durch diese sogenannten Relativpunkte wird ein Ausgleichskreis gezogen, dessen Mittelpunkt dem Gelenkort B in der Bezugslage entspricht.

Als Eigenschaft der Lagenscharsynthese ist hier anzumerken, dass durch gezielte Wahl des Lagers B_0 , je nach oben genannten Verfahren, und Festlegung des zugehörigen Ausgleichskreises bestimmte Lagen bevorzugt behandelt werden können:

Der Kreis kann also durch bestimmte Relativlagen von B_0 gelegt werden, was wiederum zur Erfüllung der zugehörigen Koppelpunkte führt. Nähere Untersuchungen siehe [7].

Die Umlauffähigkeit wird über den Satz von Grashof bestimmt. Ist diese gegeben, steht als nächster Schritt die Genauigkeitsberechnung an.

Dazu wird der Abstand eines jeden berechneten Ist-Koppelpunkts zu dem ihm nächstgelegenen Punkt der vorgegebenen Soll-Koppelkurve berechnet. G. Lohse berechnet in [7] den Abstand eines jeden generierten Punktes zu dem ihm zugeordneten vorgegebenen Koppelpunkt, was durch Indexverschiebungen zu überproportionalen Abweichungen führen kann. Aus allen so zielgerichtet entworfenen und gleichzeitig umlauffähigen Viergelenken kann jenes mit der höchsten Erfüllung der Vorgabe ermittelt werden.

9 Programmaufbau

Die Benutzeroberfläche ist daran orientiert, den Nutzer bei der Konzentration auf die eigentliche Konstruktion zu unterstützen [8]. Im ersten Fenster wird daher nur die gewünschte Koppelkurve durch beliebig viele Stützpunkte eingegeben. Sie kann dann noch korrigiert werden, bevor sie an die Synthese weitergegeben wird. Es können auch gespeicherte Kurven wieder geladen werden.

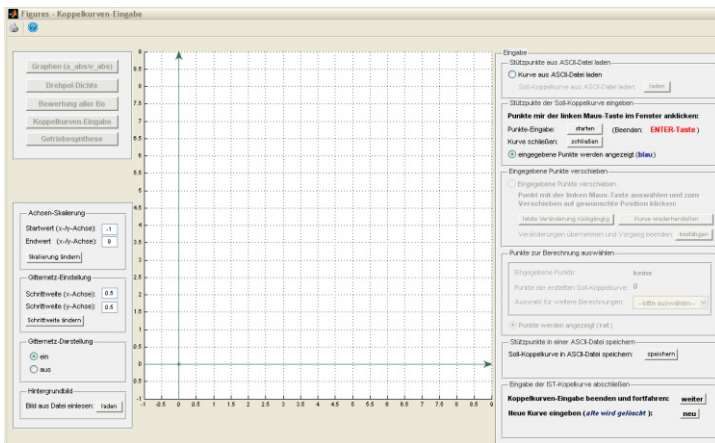


Abb. 6: Eingabemaske für gewünschte Koppelkurve

Im zweiten Fenster kann eine Vielzahl an Einstellungen bezüglich Automatisierungsgrad und B_0 -Bestimmungs-Methoden vorgenommen werden. Die Ergebnisse werden dann in einem Fenster wie dem folgenden dargestellt.

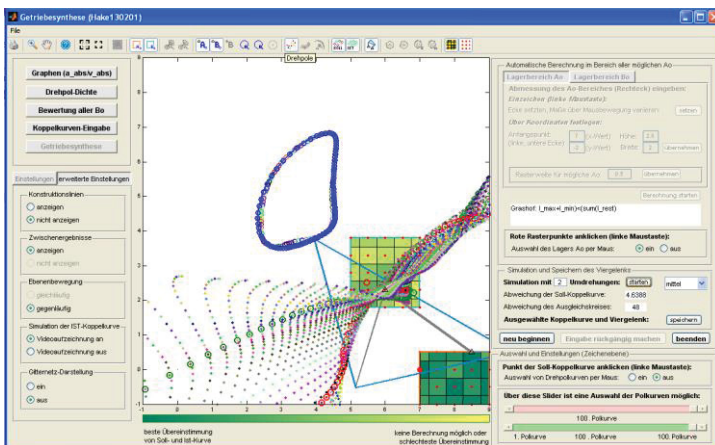


Abb. 7: Ergebnis mit Viere gelenk. Zwei Bereiche für An- und Abtrieb (je dunkler, desto besser), Wunsch-Koppelkurve (bunt), Ist-Koppelkurve (blau), Drehpolwolke (Polkurven zu Nah- und Fernpunkt leicht hervorgehoben)

10 Beschreibung der Zielfunktion

Bei der Bewertung der synthetisierten Viergelenke sowie bei der automatischen Ermittlung des besten wird der euklidische Abstand jedes Ist-Punktes zu dem ihm am nächstgelegenen Sollpunkt der Koppelkurve gemäß Formel 10.1 aufsummiert:

$$\varepsilon_{ku} = \sum_n \sqrt{\left(k_{xi_n} - k_{xs_{\text{nächstgelegenen}}}\right)^2 + \left(k_{yi_n} - k_{ys_{\text{nächstgelegenen}}}\right)^2} \quad (10.1)$$

Wie in Abb. 7 sichtbar, werden die umlauffähigen Viergelenke nach ihrem Erfüllungsgrad der Koppelkurve farblich dargestellt. Je dunkler, desto besser ist der Lagerort geeignet. Zu jedem A_0 -Ort gehört eine eigene Karte für den B_0 -Bereich, da sich die Lagenscharen und somit die Relativlagen von B_0 natürlich unterscheiden.

Die Ermittlung der Eignung der B_0 -Orte erfolgt über die Abweichung der Relativlagen-Orte von ihrem Ausgleichskreis, gemäß Formel 10.2.

$$\varepsilon_{kr} = \sum_{i=1}^n \left(\sqrt{\left(B_x - B_{0x}^i\right)^2 + \left(B_y - B_{0y}^i\right)^2} - B_{\text{Radius}} \right) \quad (10.2)$$

11 Zusammenfassung der Ergebnisse

Es konnte gezeigt werden, dass viele Punkte als Koppelkurvenvorgabe in Verbindung mit der Lagenscharsynthese eine sinnvolle Basis und eine umsetzbare Methode für die Viergelenksynthese darstellen.

Die Automatisierbarkeit wurde gezeigt und umgesetzt. Das erforderliche Vorwissen wurde stark reduziert.

Die Erstellung von Lösungsraum-Landkarten wurde gezeigt.

Literatur

- [1] Volmer, J.: *Getriebetechnik: Lehrbuch*. 5. durchges. Aufl. Berlin: Verl. Technik, 1987. ISBN 3-341-00270-7
- [2] Angeles, J.: Optimierung ebener, sphärischer und räumlicher Getriebe zur approximierten Lagenzuordnung. *Mechanism and Machine Theory* (1986), 21(2), pp. 187-197.
- [3] Strauchmann, Heinz, Prof. Dr.-Ing habil.: Nutzerinformation Approx für Windows
- [4] Braune, R., Prof.: eLearning Genesys. Sept. 2009
- [5] ARTAS: SAM 6.1 – Die Ideale Hilfe beim Getriebeentwurf, <http://www.artas.nl/de/sam> abgerufen am 28.06.2013
- [6] Lohse, P.: *Getriebesynthese*, 4. Auflage, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Springer Verlag.
- [7] Lohse, G.: Analyse-Umkehr als Näherungsverfahren zur Punktlagensynthese ebener Viergelenke, 1991, Dissertation TU München, Lehrstuhl für Feingerätebau und Getriebelehre
- [8] Heidler, M. : Semesterarbeit: *Benutzeroberfläche zur Lagenscharsynthese umgesetzt in einem Matlab-basierten MVC-Konzept*, Lehrstuhl MiMed, TU München
- [9] Büscher, W.: Diplomarbeit: *Objekt-orientierte, Matlab-basierte Umsetzung der Lagenscharsynthese in der Getriebetechnik*, Lehrstuhl Mimed, TU München